

Structure et fonctionnement d'un système eau-sol-végétation

Une toposéquence ferrallitique de savane (Katiola, Côte d'Ivoire)

Roland POSS (1), Christian VALENTIN (2)

(1) Centre O.R.S.T.O.M., B.P. 375, Lomé (Togo)

(2) Centre O.R.S.T.O.M., B.P. V 51, Abidjan (Côte d'Ivoire)

RÉSUMÉ

Afin d'apporter des précisions, à la suite de travaux de cartographie, quant aux propriétés, au fonctionnement, et au comportement des sols les plus représentés dans la région centrale de la Côte d'Ivoire, une étude expérimentale a été entreprise sur trois sites, le long d'un versant dominé par un plateau cuirassé. L'organisation générale de la couverture pédologique est sensiblement constante : des horizons gravillonnaires qui apparaissent entre 10 et 20 cm de profondeur recouvrent une allérite ferrallitique de schistes. Il existe cependant des différenciations le long du versant : alors que sous forêt claire sèche à l'amont, les matériaux sont typiquement ferrallitiques, ils présentent à l'aval, sous savane arborée, des indices d'éluviation.

Les organisations et leur fonctionnement sont présentées selon un plan qui reflète les différentes étapes suivies par l'eau dans le sol. Sont ainsi étudiés successivement les différents volumes qui interviennent sur l'interception de la pluie, la pénétration de l'eau à travers la surface, sa circulation à l'intérieur de la couverture pédologique et son devenir en profondeur. Les auteurs montrent ainsi que ce sont les caractères du couvert végétal, des organisations de surface, et de l'horizon superficiel qui conditionnent l'entrée de l'eau dans le sol. Les organisations des horizons profonds déterminent ensuite le type de drainage : tant leurs caractères morphologiques que les mesures menées sur ces matériaux démontrent qu'à l'amont, il est vertical et libre toute l'année. A l'aval, par contre, certaines différenciations pédologiques indiquent l'apparition, en année particulièrement pluvieuse, d'une nappe circulante. Enfin, les différentes formes de la porosité, y compris celle des gravillons, permettent une mise en réserve de l'eau. Ces quantités stockées ne correspondent pas, dans le cadre de cette étude, à la répartition actuelle de la végétation. Ce décalage résulterait de l'anthropisation du milieu : la forêt qui devait s'étendre plus largement sur les versants a été repoussée sur les sommets par les défrichements et les feux de brousse.

Dans les conditions naturelles, la qualité agrologique décroît sur le versant. Mais la mise en valeur entraîne des bouleversements tels qu'il est difficile de prévoir si elle accentuera, ou, au contraire, estompera ce gradient de contraintes.

MOTS-CLÉS : Sols ferrallitiques — Hydrodynamique — Simulation de pluie — Infiltrabilité — Réorganisations superficielles — Composition volumique — Profils hydriques — Réserves hydriques — Mise en valeur.

SUMMARY

STRUCTURE AND FUNCTIONING OF A VEGETATION-SOIL-WATER SYSTEM. A SAVANNAH FERRALLITIC TOPOSEQUENCE (KATIOLA, IVORY COAST)

In addition to the soil survey of the area, an experimental study was carried out to better document the properties, the functioning and the behavior of the soils that extend the most over central Ivory Coast. Three sites were selected on a slope overtopped by an iron-panned plateau. The general arrangement of the soil rind was found rather constant : gravelly horizons occur at a depth ranging from 10 to 20 cm and overlie weathered materials developed from shale. However, some differentiations could be observed among the vegetative cover and the soils in relation with their

topographic locations: uphill, under an open woodland, soils are typically ferrallitic whereas downhill, under an arboreal savannah cover, they exhibit marks of eluviation.

The plan of presenting and discussing the observations and results on the arrangements and their functioning reflects the consecutive stages of rainwater into soil. Thus have been studied in succession the various volumes that affect rainfall interception, penetration of water through soil surface, its circulation within soil body, and its further evolution in deep soil. Accordingly, the authors indicate that the ingress of water into soil is influenced by the features of vegetative cover, soil surface and top soil. Hereafter, drainage regime is determined by the arrangements of deep soil: their morphological characters as well as the measurements conducted on these materials demonstrated that, uphill, all year round, water flow is unhindered and vertical. In contrast, some pedological differentiations suggest the occurrence of a flowing watertable during peculiarly wet years. Finally, the various forms of porosity, even including the voids in gravel, permit water storage. In these local conditions, these amounts of stocked water could not be correlated to the present distribution of the vegetative cover. This discrepancy could be ascribed to man influence: the forest which likely covered a larger part of slopes has been repelled by clearing and bush-fires to the hill-tops.

In natural conditions, land-capability decreases along the slope. But land use induces such disruptions that it is difficult to anticipate whether it will emphasize or, in the opposite, will tend to obliterate this gradient in limitations.

KEY WORDS : Ferrallitic soils — Hydrodynamics — Rainfall simulation — Infiltrability — Surface sealing — Composition in volume — Soil moisture profile — Water storage — Soil use.

INTRODUCTION

Située au centre de la Côte d'Ivoire, la région de Katiola connaît actuellement un développement économique rapide, principalement axé sur les productions agricoles. Les projets de mise en valeur ont nécessité une connaissance plus approfondie du milieu, et notamment des sols. C'est ainsi qu'une carte morpho-pédologique à 1/200 000^e a récemment été levée dans cette zone (Poss, 1982).

Mais, si l'organisation des sols a pu être précisée, les renseignements sur leurs comportements restent très limités, malgré leur importance pour la mise en valeur. En particulier, le devenir de l'eau dans le sol n'est connu que très grossièrement par les bilans hydrologiques calculés à l'échelle des bassins versants. C'est pourquoi nous avons cherché, lors d'une campagne de mesures en saison des pluies (septembre) et complétée de quelques mesures en saison sèche (janvier), à préciser certains paramètres indicateurs du comportement hydrique de ces sols (infiltration, circulation et stockage de l'eau), dans les conditions naturelles, et après labour. Ces données sur leur fonctionnement, en liaison avec les caractères morphologiques, permettent de proposer quelques orientations pour leur mise en valeur.

Le plan diffère de celui généralement suivi dans les documents pédologiques : les organisations ne sont pas décrites par profil, mais par volumes se succédant verticalement, et couvrant le versant. Le fonctionnement de ces couvertures végétales et pédologiques est présenté et analysé selon les différentes étapes du flux hydrique : interception par la végétation, infiltration à travers la surface, circulation à l'intérieur du sol, et devenir en profondeur. En effet,

ces différents mécanismes obéissent à un déterminisme chronologique. Par contre, comme nous le montrerons, en accord avec ce qui a déjà été observé en région sub-désertique (VALENTIN, 1981), il est plus contestable de considérer que les mécanismes de profondeur interviennent sur ceux de la surface.

1. LE PAYSAGE ET L'ORGANISATION GÉNÉRALE DES SOLS

La cartographie à 1/200 000^e de la région a permis de distinguer 12 paysages morpho-pédologiques différents, caractérisés par un type de modelé et une répartition des sols. Parmi eux, le paysage de plateaux et de témoins cuirassés partiellement démantelés représente le tiers de la superficie totale (fig. 1 et tabl. 1). De plus, ce paysage est l'un des plus favorables à la mise en valeur choisie par la Côte d'Ivoire

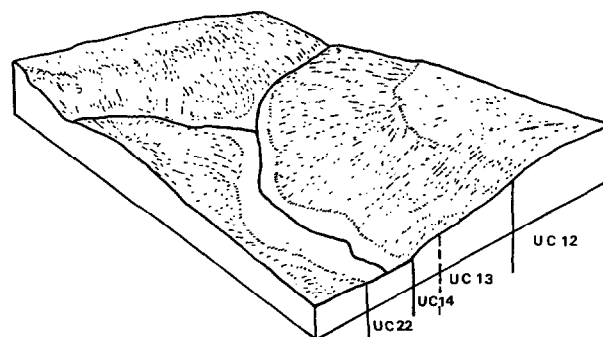


Fig. 1. — Paysage de plateaux et de témoins cuirassés partiellement démantelés

TABLEAU 1

Principales caractéristiques du paysage de plateaux et de témoins cuirassés partiellement démantelés. Situation des sites étudiés

Extension Km ² et %	Déni- velée	Longueur du 1/2 inter- fluve	Unité carto- graphi- que	Extension (longueur ou surfa- ce)	Segments pédologiques	Modelé	Pentes moy. ext.	Caractères généraux des sols	Profondeur (moyenne)	Eléments grossiers (moyenne)	Drainage interne de l'apexol	Végétation
1994 km ² 33%	35 m (20-50)	1200 m (900 à 2.000 m)	sommets d'inter- fluve 12 a (UC 12)	50 ha (5 à 450 ha)	plateau (gravil- lonnaire et in- duré) (segment 1)	plan (plus ou moins irrégulier)	0,9 0 2	sols ferralliti- ques, rouges gra- villonnaires, indu- rés à la base	45 (0 à 130)	50	très rapide	savane arbo- rée ou arbus- tive
				12 a (47.000 ha)	plateau (gravil- lonnaire et pro- fond) (segment 2)	plan (plus ou moins irrégulier)	0,9 0 2	sols ferralliti- ques, rouges gra- villonnaires, in- durés à la base	105 (25 à 150)	45	très rapide	savane arbo- rée ou arbus- tive
			versant (UC 13)	850 m 63 a (253.000 ha)	zone de raccord entre les pla- teaux et les ver- sants (segment 1)	concave puis rectiligne	7,0 3 20	sols ferralliti- ques pénervolés, moules, gravil- lonnaires et al- tériques à fai- ble profondeur	60 (8 à 150)	40	très rapide	savane arbo- rée
					amont (segment 2) SITES I et II	généralment rec- tiligne, parfois convexe ou recti- ligne convexe	2,7 1 6	sols ferralliti- ques gravillon- naires, altériti- ques à la base	90 (25 à 150)	35	très rapide à moyen	savane arbo- rée ou forêt clairse
					aval (segment 3) SITE III	souvent rectili- gne plus ou moins convexe ou concave, parfois convexe ou concave	3,0 0 -	sols ferralliti- ques gravillon- naires, hydromor- phes et (ou) in- durés à la base	65 (0 à 150)	35	rapide à mo- yen, souvent ralenti à la base	savane arbo- rée ou arbus- tive
					amont (segment 1)	convexe ou recti- ligne à l'amont, convexe passant souvent à concave à l'aval	3,1 0 7	sols sableux en surface, indurés et (ou) hydromor- phes en profon- deurs	50 (0 à 90)	<5	rapide à mo- yen, souvent ralenti à la base	savane arbo- ursive
			pente de rai- cord (UC 14)	200 m 25 a (98.000 ha)	aval	concave ou recti- ligne concave sur le versant, pas- sant à rectiligne dans le bas-fond	3,1 1 12	sols hydromorphes de texture très variable	45 (20 à 130)	<5	ralenti	savane her- beuse (forêt galerie)
					plaine (UC 22)	<<1 a SITE IV	plan	sols hydromorphes de texture très variable	-	<5	ralenti	savane her- beuse

(cultures annuelles mécanisées en assolement intensif) avec 67 % de surface utilisable : une partie du plateau (unité cartographique 12 segment 2) et presque tout le versant (unité 13 segment 2 et 3). C'est pourquoi c'est dans ce paysage que nous avons choisi de caractériser les propriétés physico-chimiques et hydrodynamiques des sols, à partir d'une toposéquence choisie pour sa représentativité (KOBO II, fig. 2).

Cette toposéquence diffère toutefois du type moyen par la faible extension du plateau cuirassé. Si l'on excepte le plateau à dalle affleurante ou à sols squelettiques très gravillonnaires, et le bas-fond hydromorphe, les sols présentent une succession verticale d'organisation assez constante, caractéristique de ce type de modelé, comportant la superposition de quatre matériaux :

- un matériau de surface (horizons A), humifère, dont l'épaisseur varie entre 10 et 20 cm ;

- un matériau gravillonnaire, d'épaisseur variable, mais généralement comprise entre 35 et 60 cm, imprégné de matière organique au sommet, dont les caractères morphologiques varient considérablement le long du versant (horizons A-B et B). Ce matériau s'indure en carapace vers l'aval ;

- un matériau non gravillonnaire hétérogène comprenant une phase altéritique, dont la nature varie selon la position topographique (horizons B-C).

- un matériau altéritique, à structure conservée, très peu pédoturbé à partir de 1,5 à 2,5 m ;

- la roche non altérée n'a pas été observée dans les fosses de 3 mètres ouvertes pour cette étude. Sur d'autres toposéquences comparables, des puits de 6 mètres n'ont pas non plus permis de l'atteindre.

2. L'ENTRÉE DE L'EAU DANS LE SOL

2.1. Les pluies

L'avancée vers le nord du front intertropical varie selon les années. C'est pourquoi, dans la région de Katiola, les pluies peuvent être rassemblées en une seule saison, comme dans les régions situées plus au nord, ou en deux, comme dans les zones plus méridionales. Il en résulte de fortes variations (écart-type de 266 mm) au niveau de la pluviométrie annuelle (fig. 3) qui rendent la notion de pluviométrie moyenne annuelle (1 200 mm pour la période 1951-1980) peu utilisable.

La répartition des pluies au cours de la, ou des, saisons humides est assez uniforme, avec néanmoins un maximum au cours de la deuxième décennie de septembre (fig. 4, LHOMME et MONTENY, 1979).

L'intensité des averses est élevée (BRUNET-MORET, 1967), particulièrement lors de la période orageuse

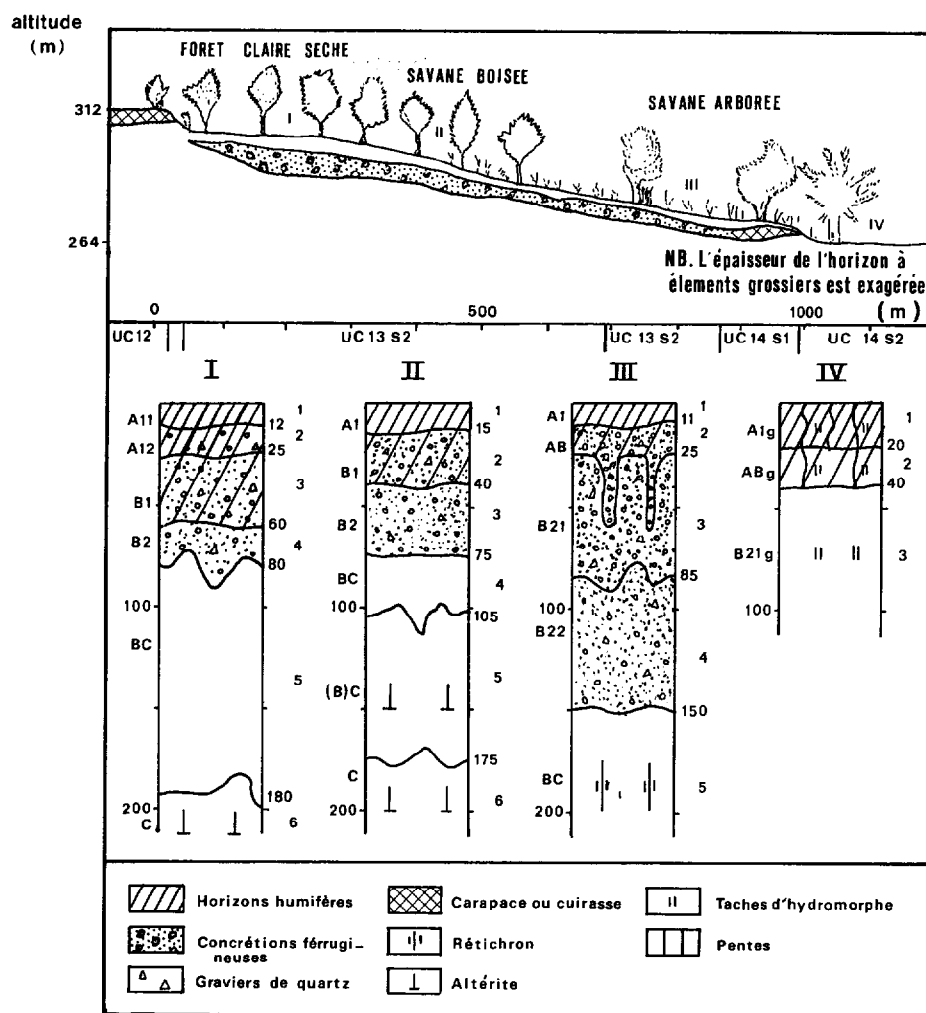


Fig. 2. — Schémas de la toposéquence et des sites expérimentaux

du début de la saison des pluies (120 mm/h pendant 30 minutes, en fréquence annuelle). L'action érosive de ces pluies est alors accentuée par la dénudation du sol consécutive aux feux de brousse tardifs : les pertes en terres se trouvent alors multipliées par 80 (COLLINET & VALENTIN 1984). Notons toutefois que l'indice d'agressivité climatique estimé pour Katiola ($R = 600$) est de l'ordre de la moitié de celui établi par ROOSE (1977) à Abidjan.

2.2. Les états de surface

Avant de circuler dans le sol, l'eau pluviale traverse une série de volumes naturels, biologiques ou minéraux, qui modifient le flux hydrique :

- le couvert végétal intercepte les eaux de pluie

et modifie ainsi le total pluviométrique et l'énergie cinétique des gouttes ;

- la surface du sol intervient sur le ruissellement et l'érosion ;

- l'horizon supérieur du sol forme un premier réservoir et une zone de transmission vers les horizons profonds.

2.2.1. LE COUVERT VÉGÉTAL

Une forêt claire couvre le sommet du versant (site I, fig. 2). Les arbres sont répartis en deux strates principales, les cimes atteignant 12-15 mètres (environ 180 arbres/ha) et 7-8 mètres (environ 70 arbres/ha). Les plantes de sous-bois et les graminées, regroupées en touffes, couvrent la quasi-totalité du

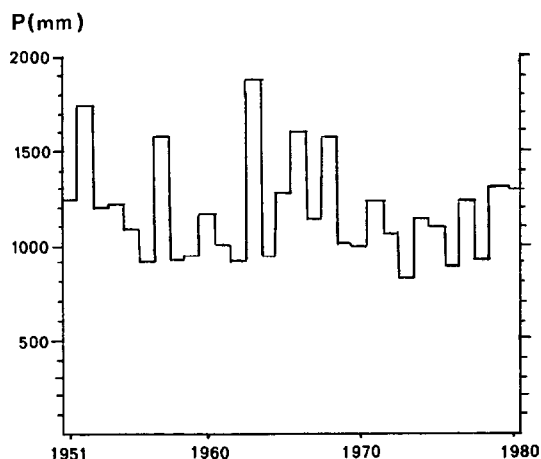


Fig. 3. — Pluviométrie totale annuelle de la station de Katiola (période 1951-1980)

sol et ne sont que peu touchées par les feux de brousse de la saison sèche. Vers l'aval, une savane boisée succède très rapidement à la forêt claire (site II). La formation précédente se réduit à quelques îlots d'une quinzaine de mètres de diamètre. Ailleurs, les ligneux constituent une strate arbustive (hauteur 5-6 mètres, densité environ 180 arbres/ha). Le couvert graminéen, en touffes, subit davantage l'action des feux de brousse qu'au sommet de la toposéquence : alors que les herbes assurent une couverture totale en saison des pluies, elles ne protègent plus que 30 % de la surface en saison sèche (estimations visuelles), laissant ainsi apparaître une proportion importante de surfaces nues.

En bas de versant (site III), la savane s'éclaircit (savane arborée). Trois strates ligneuses ont été distinguées :

— hauteur 8-12 mètres, densité : 15 arbres/ha

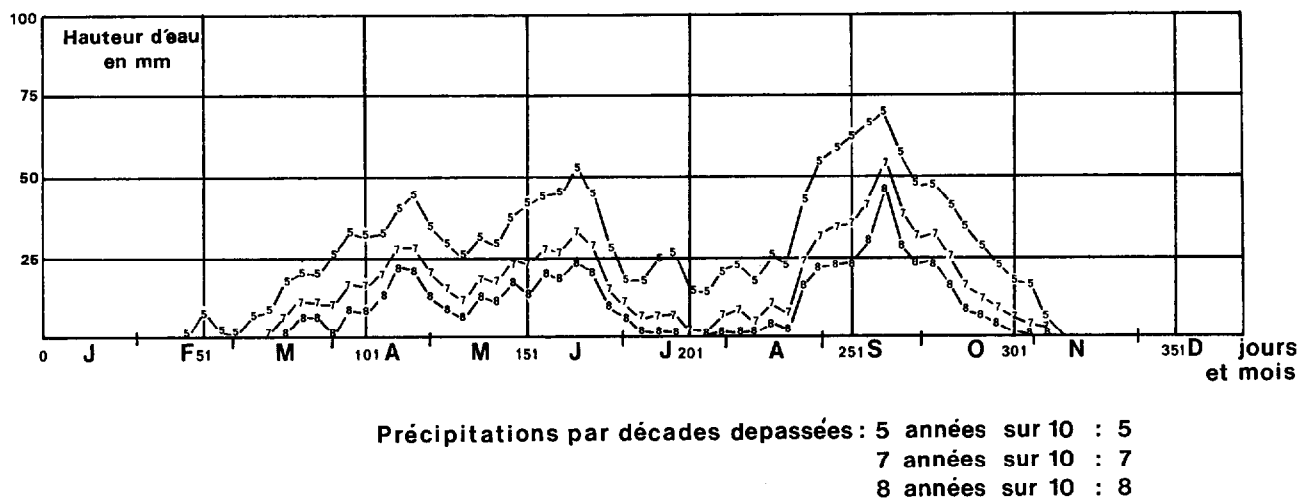


Fig. 4. — Analyse fréquentielle des pluies à Katiola (LHOMME et MONTENY, 1979)

- hauteur 4-5 mètres, densité : 50 arbres/ha
- hauteur 2-3 mètres, densité : 50 arbres/ha.

Même en saison des pluies, les touffes de graminées ne couvrent pas plus de 50 % de la surface du sol.

Le bas-fond (site IV) est recouvert par une savane herbeuse. Les espèces ligneuses ne sont représentées que par une trentaine d'arbres par hectare, dont un tiers de palmiers. La strate herbeuse couvre près de 100 % de la surface, même en saison sèche, car les végétaux ne sèchent pas suffisamment pour pouvoir brûler.

2.2.2. LA SURFACE DU SOL

Sur l'ensemble de la toposéquence, la surface du sol présente, entre les touffes de graminées, une *organisation pelliculaire* dont l'épaisseur varie de 2 mm au sommet (site I) à 3-4 mm sur le versant (sites II et III).

Au sommet, cette pellicule est recouverte, sur près de 50 % de sa surface, par des résidus végétaux et des turricules de vers de terre. Vers l'aval, un matériau constitué de sables fins, distribué en réseau à la surface du sol, recouvre de plus en plus cette

TABLEAU 2

Principaux caractères des horizons superficiels

CARACTERES	UNITES ET REMARQUES	SITES		
		I	II	III
Couleur	en humide	7,5 YR 3/3 brun foncé	7,5 YR 3/3 brun foncé	7,5 YR 3/3 brun foncé
Granulométrie	argile %	20,0	23,9	15,8
	limons %	36,3	43,9	37,9
Structure	type	grumeleuse	grumeleuse	grumeleuse
	taille	fine et	fine à	très fine à
	netteté	moyenne	grossière	grossière
		nette	nette	très nette
Porosité	appréciation globale	très poreux	poreux	très poreux
	pores: abondance	nombreux	très nombreux	nombreux
	taille	très fins et	très fins et	très fins
	type	moyens	fin	vacuolaires
Volume d'air en saison des pluies	l/m ²	54	28	48
Cohésion	appréciation à l'état frais	meuble	meuble	très meuble
Dureté	résistance à la pénétration à l'état frais, daN/cm/cm ²	4,3	13,3	13,7
2-a- Caractères physiques				
Matière organique	%	4,6	3,3	2,3
Somme des bases	S meq./100g	11,0	5,4	5,0
Taux de saturation	S/T %	97	100	100
pH	eau	6,6	6,4	7,0
N total	%	1,83	1,38	0,98
P2O5	%	0,99	0,62	0,41
2-b- Caractères chimiques				
Racines	densité: g de matière sèche/l de sol	6,81	1,76	1,30
Mésafaune	nombre de lombrics extraits au formol/m ²	101	54	50
Microfaune	indice de vitesse de nitrification	152	110	47

2-c- Caractères biologiques

pellicule : sur le site III, ce recouvrement forme un « micro-horizon » discontinu (80 % de la surface) épais de 2 mm, qui présente une organisation litée.

Cette répartition des micro-horizons superficiels le long de la toposéquence laisse supposer qu'il existe une érosion laminaire, mais que les sables fins ne sont pas tous exportés du versant et se déposent en bas de pente. A certains endroits les organisations superficielles sont constituées de la superposition de plusieurs couples de micro-horizons : sables fins légèrement cimentés qui recouvrent une pellicule plasmique. Une telle succession est assez fréquente : elle a été observée dans des zones plus sèches comme Agadez (VALENTIN, 1981) ou le Ferlo (VALENTIN, 1983). Elle correspond à une disjonction in situ sous l'effet de la pluie du squelette (par rejaillissement) et du plasma (par micro-transfert vertical) qui se

produit dans des matériaux dont l'origine est sans importance : il peut s'agir d'apports éoliens, ou de sédiments fluviaux, ou comme ici d'apports par ruissellement. Celui-ci dépose en bas de versant des matériaux hétérométriques qui subissent in situ un tri granulométrique (formation des deux micro-horizons) avant d'être recouvert par de nouveaux apports, qui eux-mêmes subissent la même disjonction, d'où cette superposition de plusieurs couples sables fins-pellicule.

2.2.3. LES HORIZONS SUPÉRIEURS

Sur l'ensemble de la toposéquence, les horizons supérieurs sont de couleur identique (brun rougeâtre en sec-5YR3/2- et brun foncé en humide-7,5YR3/3) et présentent des épaisseurs et des textures voisines

(tabl. 2). La transition avec l'horizon gravillonnaire sous-jacent est distincte et ondulée, jamais brutale. Le taux volumique des gravillons, dans les horizons supérieurs, ne dépasse pas 5 %. Les variations des caractères de ces horizons le long de la toposéquence sont présentés sous forme synthétique dans le tableau 2.

Ce tableau suscite trois remarques :

— l'horizon supérieur du sol forestier (site I) est non seulement le plus riche en bases échangeables, mais encore en racines, et en lombrics. Il est en outre le moins dur ;

— le site II a des caractères intermédiaires entre ceux des deux autres sites pour le taux de matière organique, l'azote total, l'indice de vitesse de nitrification et le phosphore. Ce fait est probablement à rapprocher de la diminution du couvert graminéen le long du versant ;

— le deuxième site se différencie également nettement par une rétention d'eau bien inférieure.

2.3. Évaluation de l'infiltrabilité en saison des pluies

2.3.1. LA SIMULATION DE PLUIES

L'infiltrabilité est le régime avec lequel le sol peut absorber l'eau fournie en surface du sol (HILLEL, 1974). Nous avons tenté d'évaluer cette caractéristique des sols au moyen de deux techniques : mesures sous lame d'eau, et sous pluies simulées. L'utilisation d'un infiltromètre à aspersion (ASSELIN et VALENTIN, 1978) permet de reconstituer sur une parcelle d'un mètre carré des séquences pluvieuses dont les intensités, les durées, les énergies cinétiques sont proches de celles des pluies naturelles (VALENTIN, 1978 ; Ruiz FIGUEROA, 1983). Cet appareil est constitué d'un bâti en forme de tronc de pyramide dont la base couvre une surface de 4,0 m × 2,8 m, et le sommet 2,0 × 1,4 m. Sa hauteur totale est de 4,1 m. Le système d'aspersion est constitué d'un gicleur animé d'un mouvement oscillant par un moteur électrique (d'essuie-glace). Le réglage à volonté de l'amplitude d'oscillation permet de fixer l'intensité souhaitée. Un système de biellette permet de faire varier l'intensité au cours des essais et de reconstituer ainsi des hyétogrammes analogues à ceux des pluies naturelles. L'alimentation en eau est assurée par une petite motopompe à partir d'une réserve : fûts de 200 litres, ou remorque-citerne. Deux manomètres permettent de contrôler à la sortie de la moto-

pompe, et à l'entrée du gicleur la pression qui doit rester constante au cours des essais.

Le ruissellement est enregistré à l'aide d'un limnigraphe de laboratoire à mouvement rapide (précision 0,1 mm et 15''). Les prélèvements d'eau, afin de déterminer les variations de la turbidité, sont effectués à partir de la goulotte qui collecte les eaux de ruissellement.

Les mesures ont été réalisées au cours d'une saison des pluies. Sur chaque site, deux parcelles ont été implantées, chacune recevant en 4 jours 300 mm de pluie, avec des intensités comprises entre 30 et 140 mm/h. Après les deux premiers jours de mesures et une période de ressuyage, les parcelles ont été labourées manuellement à la houe sur une profondeur de dix centimètres, et aplanies afin d'obtenir des surfaces nues traitées de manière homogène.

2.3.2. LES PRINCIPAUX PARAMÈTRES DE L'INFILTRABILITÉ

Les mesures d'intensité de ruissellement et d'infiltration n'ont pas été reliées à des mesures d'humidité et de potentiel de l'eau dans le sol. Nous nous limiterons à l'énoncé des résultats concernant les principaux paramètres empiriques (COLLINET et VALENTIN, 1979). Le coefficient de ruissellement retenu (lame ruisselée / hauteur de pluie) ne permet pas d'évaluer directement le coefficient d'écoulement (1) pour la toposéquence. Il serait nécessaire, en effet, d'établir les fonctions de transfert entre les sites. De plus, le protocole utilisé entraîne une surévaluation du ruissellement puisque les pluies sont plus rapprochées dans le temps que les séquences pluvieuses naturelles. En conditions naturelles, le ruissellement enregistré sur les parcelles situées sous forêt correspond à des valeurs inférieures à la moitié de celles obtenues sous savane (tabl. 3). En ne tenant pas compte des quan-

TABLEAU 3
Principaux paramètres empiriques de l'infiltrabilité

Sites	ÉTAT NATUREL			APRÈS LABOUR		
	I	II	III	I	II	III
Coefficient de ruissellement Kr (%).....	25,8	58,2	58,6	69,5	86,2	70,3
Pluie d'imbibition Pi (mm).....	19,5	18,6	16,0	2,7	4,0	4,5
Intensité imite de ruissellement I ₁ (mm/h).....	24,3	13,6	20,6	20,3	11,1	6,1

(1) Coefficient d'écoulement : rapport entre le volume écoulé, mesuré à un exutoire, sur le volume des précipitations enregistré sur un bassin versant.

tités interceptées par la végétation arborée, il ressort de ces résultats que lors des pluies simulées, les sols situés sous forêt ont perçu plus d'eau de percolation que les sols sous savane.

Deux conditions doivent être simultanément remplies pour qu'apparaisse le ruissellement :

— une certaine hauteur de pluie doit être atteinte : c'est la pluie d'imbibition. P_i (LAFFORGUE, 1977), encore appelée pluie d'initiation. Il est à noter que pour ce paramètre les écarts entre sites sont faibles. Compte-tenu du protocole, il a été difficile de distinguer l'effet des réorganisations superficielles de celui de l'état hydrique du sol sur la réduction sensible de la pluie d'imbibition après labour. Il faut souligner que les valeurs obtenues en conditions naturelles, sur une surface d'un mètre carré : de 16,0 à 20,0 mm, diffèrent peu de celle retenue par les hydrologues (CAMUS *et al.*, 1976) pour un petit bassin versant situé 140 km plus au Nord, à Korhogo : 15 mm, en saison des pluies ;

— l'intensité de pluie doit excéder une valeur appelée intensité limite de ruissellement, I_1 . Comme pour P_i , les résultats acquis sur petites parcelles (tabl. 3) sont du même ordre que ceux obtenus sur le bassin versant précédent où $I_1 = 18$ mm/h. Mais, pour ce paramètre, les écarts entre sites sont plus marqués : en conditions naturelles, le site II présente l'infiltrabilité la plus faible. Le labour induit une nette réduction de I_1 pour le site de bas de pente (III) où le ruissellement apparaît pour des intensités de pluie très faibles : 6,1 mm/h. Ceci a pu être vérifié au cours d'une pluie naturelle de faible intensité. Ces différences entre sites sont à attribuer, pour l'essentiel, aux écarts observés quant à l'intensité des réorganisations superficielles qui, comme nous le verrons est bien plus marquée à l'aval qu'à l'amont. Dans ces conditions, la valeur de l'intensité limite de ruissellement peut être considérée comme égale à la conductivité hydraulique à saturation des micro-organisations pelliculaires superficielles (VALENTIN, 1981).

2.3.3. ÉTATS DE SURFACE ET INFILTRABILITÉ

En conditions naturelles, les biopores ouverts en surface (racines et faune) paraissent suffisamment nombreux pour que l'infiltrabilité soit déterminée, au moins en partie, par la porosité de l'horizon supérieur. En effet, l'intensité limite de ruissellement croît linéairement avec le volume occupé par l'air en saison des pluies (linéarité fondée sur 3 points seulement). La faible valeur obtenue sur le deuxième site (13,6 mm/h) est à rapprocher du volume réduit disponible pour l'eau d'infiltration dans l'horizon supérieur de ce site au cours de la saison des pluies (28 %, tabl. 2, fig. 6).

Après labour, cette porosité et son accessibilité devraient s'accroître. En fait, la surface du sol est soumise à l'impact direct des gouttes de pluies et réagit en fonction de sa sensibilité à la formation d'une pellicule. C'est l'examen des pellicules formées sur les trois sites après labour qui permet d'expliquer les valeurs d'intensité limite de ruissellement obtenues : sur les deux premiers sites (I et II), il s'agit d'organisations constituées de l'assemblage de micropeds plasmiques, accolés et tassés sous l'effet des gouttes de pluie (« traits laminaires à concentration plasmique », de BLIC, 1979) alors que l'organisation pelliculaire superficielle du site III présente des indices de transformation plus poussée : dissociation du squelette et du plasma, distribués sous forme de traits laminaires parallèles à la surface. Or il a été montré (VALENTIN, 1981) que ce type d'organisation litée présente une porosité très faible qui limite considérablement l'infiltrabilité.

2.4. Variations saisonnières de l'infiltrabilité

Les résultats de tests d'infiltration réalisés sous lame d'eau (PIOGER modifié, cf 3.1) soulignent la variabilité saisonnière des paramètres déterminant l'infiltrabilité (tabl. 5). Bien que les ordres de grandeur des « coefficients de perméabilité » PIOGER soient très différents de ceux des « intensités limites de ruissellement » obtenus sous simulateur de pluie, *le classement des valeurs reste le même* pour la saison des pluies. *Le classement de la saison sèche est différent de celui de la saison des pluies*, l'abondance des turricules sur le site I et le couvert végétal très réduit sur le site III modifiant considérablement l'infiltration.

TABLEAU 4

Coefficient de perméabilité en surface (K en cm/h). Méthode PIOGER modifiée

Sites	I	II	III
Saison des pluies.....	75	30	60
Saison sèche.....	900	50	30

2.5. Détachabilité

Les différences enregistrées entre sites quant à leur infiltrabilité entraînent des variations quant au ruissellement, et donc quant à leur sensibilité à l'érosion hydrique. Celle-ci a été appréciée sous la forme d'un indice de détachabilité défini ici comme étant égal à la turbidité moyenne des eaux de ruissellement, sous averses simulées de 120 mm/h. Les valeurs de

cet indice augmentent de l'amont vers l'aval (tabl. 5), ce qui est conforme à la susceptibilité au ruissellement mesurée sur sol nu après labour.

Le classement ainsi obtenu est analogue à celui de l'indice d'érodibilité K, qui permet de prévoir la sensibilité d'un sol à l'érosion à partir de caractères intrinsèques : texture, matière organique, structure, perméabilité (WISCHMEIER *et al.* 1971). Il semblerait ainsi que la détachabilité estimée sur un mètre carré permette de fournir des indications quant au classement des terres vis-à-vis de leur sensibilité à l'érosion. Une extrapolation à échelle plus petite nécessite cependant une grande prudence, surtout pour les sols où se manifeste une érosion linéaire.

2.6. Conclusions

Les résultats obtenus à Katiola font apparaître qu'en climat soudano-guinéen et dans les conditions naturelles, les composantes superficielles (couvert végétal, surface du sol, horizon supérieur) sont les principaux facteurs qui déterminent l'entrée de l'eau dans le sol. Or ces composantes subissent des variations saisonnières importantes (effets de la mésafaune, des feux de brousse...). Il conviendrait donc d'effectuer les mesures hydro-dynamiques au début et à la fin de la saison des pluies pour pouvoir dresser un bilan annuel au niveau de la toposéquence.

D'autre part, le rôle joué par ces composantes superficielles sur l'infiltration limite considérablement l'intérêt de mesures qui ne font intervenir qu'un des facteurs. Par exemple, la mesure, sous lame d'eau, de la perméabilité d'une colonne de sol, remanié ou non, ne peut s'appliquer qu'à l'irrigation par submersion. Il implique également que les résultats obtenus dans des conditions données soient utilisés avec précaution : ainsi les valeurs d'infiltrabilité sous végétation naturelle ne sont pas extrapolables aux sols cultivés.

3. LA CIRCULATION DE L'EAU DANS LES SOLS

3.1. La méthodologie

La circulation de l'eau est déduite de la confrontation entre les observations morphologiques et les mesures physiques. La réalisation de plusieurs profils hydriques par site au cours de la saison des pluies, a montré que le sol revenait rapidement à un état d'équilibre qui correspond aux teneurs les plus fréquentes en cette saison. Les humidités sont reportées sur un diagramme de composition volumique, établi à partir des mesures de densité apparente au cylindre et au densitomètre à membrane, ce qui permet de

TABLEAU 5

Indices de détachabilité et d'érodibilité (sol nu labouré)

Sites	I	II	III
Indice de détachabilité (mg/l) turbidité moyenne à 120 mm/h).....	785	1395	1954
Indice d'érodibilité (nomogramme)...	0,11	0,21	0,25

visualiser la porosité occupée par l'air en saison des pluies (fig. 6).

Pour caractériser la perméabilité des horizons profonds, une méthode dérivée de celle de PROGER (1952) a été utilisée. Elle consiste à faire infiltrer dans le sol une lame d'eau de 10 cm et à mesurer le temps (Δt) écoulé entre les niveaux 7 cm et 2 cm ($\Delta h = 5$ cm), ce qui correspond le plus souvent à une phase où l'intensité d'infiltration reste constante. Un coefficient de perméabilité K est ainsi calculé : $K \text{ (cm/h)} = \Delta h / \Delta t$. Les mesures sont réalisées dans des cylindres de 30 cm de diamètre sans anneau de garde. Cette méthode, déjà critiquable lorsqu'elle est appliquée à la surface du sol (elle provoque la destruction des organisations pelliculaires superficielles et ne prend en compte ni l'effet de l'impact des gouttes, ni celui de micro-relief) l'est également en profondeur, car la mise en eau conduit généralement (pour ces matériaux à faible stabilité structurale), à la formation de boue à la base de la colonne d'eau, ce qui en modifie considérablement les propriétés hydrodynamiques. Elle a néanmoins été utilisée, faute d'appareils plus performants (tensiomètre et humidimètre neutronique employés conjointement aux différentes profondeurs).

3.2. L'organisation des horizons profonds

3.2.1. LES HORIZONS GRAVILLONNAIRES

La composition des horizons gravillonnaires varie considérablement le long du versant, tant par la nature des éléments grossiers que par celle de la terre fine. En effet, les horizons gravillonnaires comportent toujours un mélange de différents types d'éléments grossiers (gravillons arrondis de 1 cm de diamètre auxquels s'ajoutent des débris de cuirasse en sommet de versant, graviers de quartz, lithoreliques de forme contournée, en bas de séquence). La proportion de terre fine associée aux éléments grossiers diminue fortement (de 55 % à 40 % en volume) sur le versant, les éléments grossiers formant l'ossature de l'horizon dans le profil du site III. Cette diminution s'accompagne également d'une modification de la nature de la terre fine. Nettement ferrallitique au sommet (phase structichrome, CHATELIN et MARTIN, 1972),

TABLEAU 6
Principaux caractères des horizons gravillonnaires

CARACTERES	UNITES ET REMARQUES	S I T E S		
		I	II	III
Couleur	en humide	2.5 YR 3/4 brun rougeâtre foncé	2.5 YR 4/6 rouge	5 YR 5/8 rouge jaunâtre
Taux en éléments grossiers	en masse % en volume %	57 45	60 45	79 59
Structure	type taille netteté	massive à sous-str. polyédrique subang. fine très nette	massive à sous-str. polyédrique moyenne nette	massive à débits anguleux, sous- str. très fine nette
Porosité	appréciation globale pores : abondance Taille type	poreux nombreux fins vacuolaires	poreux nombreux fins à moyens vacuolaires	très poreux nombreux à très nombreux fins à grossiers vacuolaires
Cohésion	appréciation à l'état frais	meuble	meuble	peu meuble
Dureté	résistance à la pénétration à l'état frais, daN/cm/cm2	4,3	13,3	13,7

6a - Caractères physiques

Matière organ.	%	1,1	0,9	0,8
Somme des bases	meq/100 g	4,6	1,1	2,0
Taux de saturation	S/T %	78	31	64
pH	eau	6,0	5,6	5,7
N total	‰	0,75	0,70	0,26
P ₂ O ₅ total	‰	0,57	0,35	0,26

6b - Caractères chimiques

rouge à tendance polyédrique, argileuse, meuble, elle devient sensiblement plus brune vers l'aval, moins argileuse et beaucoup moins meuble (cf. dureté, tabl. 6), pour devenir une carapace à l'aval du site III.

De plus, alors que les deux profils de sommet de versant (sites I et II) ne présentent aucun revêtement, si ce n'est quelques traînées brunes le long des pores, liées à l'action de la faune, celui de bas de versant est marqué par des signes de migration de matériaux (fig. 2). Les revêtements sont nombreux, beiges, très minces et ne couvrent que les replats jusqu'à 85 cm, puis ils deviennent minces à épais (jusqu'à 3 cm), limono-argileux (avec des sables fins) et ils occupent la totalité de la base des pores, mais très peu leurs faces verticales et sommitales. D'autre part, ces horizons gravillonnaires présentent des langues qui descendent jusqu'à 85 cm de profondeur, uniquement constituées de gravillons au contact les uns des autres et de sables grossiers. Plus bas, enfin, le matériau comporte des taches jaune pâle (10YR7/8 en humide).

Les principaux caractères des horizons les plus gravillonnaires de chaque profil (I.3, II.3, III.3) ont été regroupés dans le tableau 6.

3.2.2. LES HORIZONS INTERMÉDIAIRES (HORIZONS B C)

Ils apparaissent progressivement et irrégulièrement à la base des horizons gravillonnaires. Ils dérivent directement de l'évolution isovolume de l'altérite, comme l'atteste la présence de filons de quartz jusqu'à leur sommet. C'est donc entre ces horizons et les horizons gravillonnaires que s'effectue la disparition de la structure héritée de la roche-mère.

Le matériau est constitué de fragments d'altérite en place, meubles en sommet de versant, légèrement indurés au sommet de l'horizon en bas de pente, juxtaposés à un matériau pédoturbé qui présente une forte variation toposéquentielle : rouge dans les profils I et II (phase structichrome), il devient bariolé

TABLEAU 7
Principaux caractères des horizons intermédiaires

CARACTERES	UNITES ET REMARQUES	S i t e s		
		I	II	III
Couleur	du matériau pédoturbé, en humide	10 R 4/6, rouge et 10 R 3/6, rouge sombre	10 R 3/6, rouge sombre	variable (cf. texte)
Granulométrie	argile % limons %	38 26	23 40	27 38
Structure	type taille netteté	polyédrique moyenne nette	polyédrique très fine très nette	massive, à débits anguleux et sous-struct. polyédrique grossière très nette
Porosité	appréciation globale pores : abondance taille type	poreux assez nombreux larges vacuolaires	très poreux nombreux moyens et larges vacuolaires	poreux nombreux moyens (1) fins (2) (1) : vacuolaires (2) : tubulaires
Cohésions	appréciation à l'état frais	meuble	très meuble	meuble
Dureté	résistance à la pénétration à l'état frais, daN/cm/cm ²	37,7	35,3	33,0

7a - Caractères physiques

Somme des bases	S méq./100 g	4,9	0,8	3,3
Taux de saturation	S/T %	77	35	94
pH	eau	6,1	5,2	6,3
P ₂ O ₅ total	‰	0,40	0,24	0,09

7b - Caractères chimiques

de trainées blanches (phase réticchrome) dans le profil III.

En sommet de versant, ce matériau pédoturbé constitue un horizon ferrallitique fortement marqué par l'activité biologique (nombreux chenaux et cavités biologiques, partiellement remplis par des coprolites, dont les parois présentent des imprégnations brunes). Les cavités et certains pores recoupent des fragments d'altérite. L'altérite est donc ainsi progressivement incorporée, par l'action de la faune, à la phase structichrome qui lui est associée.

En bas de versant, le matériau pédoturbé est de couleur très variable : ocre à rouge, parfois noire, associée à des plages décolorées. Ces dernières sont liées à la présence de pores vacuolaires dont les parois présentent des revêtements peu épais très abondants, de couleur rose à beige.

L'évolution, le long du versant, des caractères de ce matériau pédoturbé est résumée dans le tableau 7 (les analyses n'ont pas pris en compte les différentes phases).

3.2.3. LES HORIZONS ALTÉRIQUES

Le passage des horizons intermédiaires aux horizons altériques est très progressif. L'altération est du même type sur l'ensemble de la toposéquence (schistosité subverticale très nette, couleur variable à dominante lie de vin), mais en sommet de versant le matériau est parcouru par quelques pores remplis par la phase structichrome et par quelques racines associées aux plans de schistosité, alors qu'en bas de pente il présente des passées plus blanches colonisées par quelques racines.

Les principaux caractères des altérites sont présentés dans le tableau 8.

3.3. La circulation de l'eau dans les sols de haut de versant (sites I et II)

Dans les sols de haut de versant, la circulation de l'eau est libre et verticale dans les conditions naturelles. En effet, d'une part le sol ne présente aucune

TABLEAU 8
Principaux caractères physiques des horizons altéritiques

Caractères	Unités et remarques	S i t e s			
		I	II	III	
Granulométrie	Argile %	28	25	30	
	Limons %	43	39	54	
Structure	Type, Taille, netteté	Phase altéritique Massive à éclats anguleux	Phase structichrome Polyédrique moyenne très nette	Massive à éclats anguleux	Massive à éclats anguleux
Porosité	Appréciation globale	Peu poreux	Très poreux	Peu poreux	Peu poreux
	Abondance et type de pores	Peu nombreux très fins et fins tubulaires	Nombreux, très fins et fins tubulaires	Peu nombreux, très fins et fins tubulaires	Peu nombreux, très fins et fins tubulaires
Cohésion	Appréciation à l'état frais	Meuble à très meuble	Meuble à très meuble	Très meuble	Meuble à très meuble

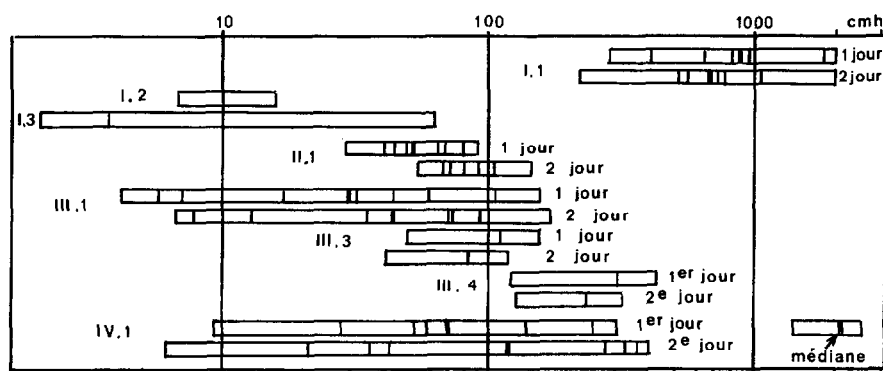


Fig. 5. — Perméabilité (méthode PROGER modifiée) des différents horizons

trace d'hydromorphie, avec un matériau rouge ferrallitique passant progressivement à l'altérite isovolume, et d'autre part aucune nappe temporaire n'a été observée, même après les pluies les plus violentes.

Pourtant la partie supérieure des horizons gravillonnaires, située entre 10 et 20 cm de la surface, est proche de la saturation pendant toute la saison des pluies (fig. 6) et la perméabilité, mesurée à l'aide de la méthode PROGER modifiée, est environ 100 fois plus faible dans ces horizons qu'en surface (fig. 5). Si la diminution de perméabilité est certainement accentuée par la formation de boue lors des mesures, il reste cependant que ces horizons constituent le principal obstacle à la circulation du flux hydrique provenant des horizons supérieurs. Durant les pluies, l'eau est stockée très provisoirement dans les horizons supérieurs avant de pénétrer dans les horizons gravillonnaires. Les horizons supérieurs affaiblissent et régularisent ainsi le flux hydrique transmis aux

horizons profonds. Ces observations rejoignent celles réalisées en Guyane (BOULET *et al.*, 1979).

Étant donnée la forte activité faunique à la base des horizons gravillonnaires (liée au maintien d'une certaine humidité au cours de la saison sèche et à la diminution du taux d'éléments grossiers) et dans les horizons B-C (alté-structichrons), il n'est pas surprenant que le flux hydrique atténué parvenant à leur niveau ne soit pas bloqué. Les diagrammes de composition volumique (fig. 6) rendent toutefois peu compte de la porosité de ces horizons, composés de l'association de deux phases, rouge ferrallitique (structichrome) à pores larges, et altéritique, à porosité très fine, car il n'a pas été possible de faire les mesures séparément sur chaque phase.

L'interprétation de la circulation de l'eau dans l'altérite est plus délicate. En effet, ce matériau présente une structure massive, avec seulement quelques pores fins visibles à l'œil nu. Cependant la

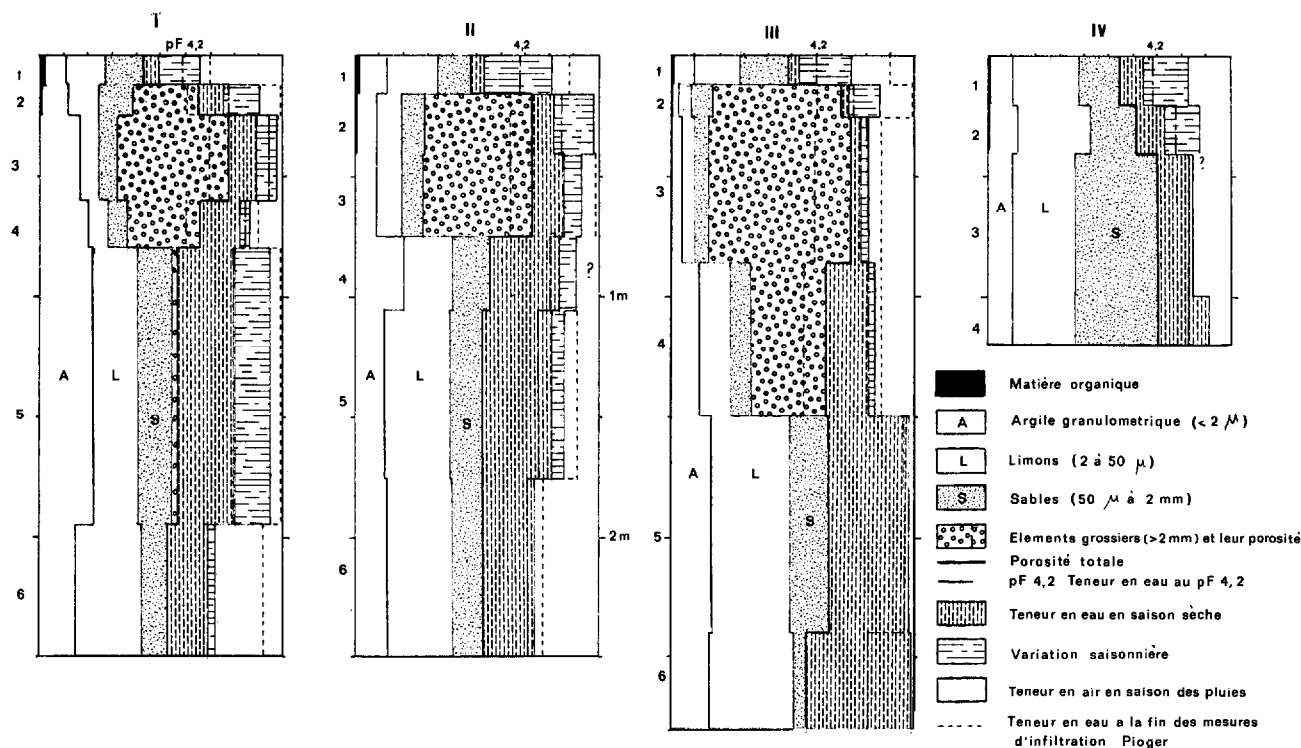


Fig. 6 — Composition volumique des sols

porosité occupée par l'eau en saison des pluies est de l'ordre de $25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Elle est donc constituée principalement par des pores non visibles, de l'ordre du dixième de millimètre de diamètre, qui résultent de l'altération en place du schiste. La perméabilité de l'horizon n'est pas mesurable, car le matériau se liquéfie lors de la mise en eau (indice d'instabilité structurale compris entre 4 et 13), ce qui interdit les méthodes sous lame d'eau.

La pénétration de l'eau en profondeur observée en conditions naturelles ne peut se maintenir que si l'eau arrivant au niveau de l'altérite n'est pas libre, ce qui conduirait à l'effondrement de la porosité. En effet l'indice d'instabilité structurale (I_s), compris entre 0,6 et 1,1 en surface — ce qui autorise des phases d'engorgement sans effondrement de la structure — augmente d'abord progressivement en profondeur (2,0 à 2,5 dans l'alté-structichron), puis brutalement au niveau de l'altérite (4 à 13). Le drainage ne reste donc vertical que parce que le flux hydrique est atténué par les horizons qui surmontent l'altérite.

3.4. La circulation de l'eau dans le sol du bas de versant

Dans le sol de bas de versant (site III), la morphologie des horizons ne correspond pas au régime

hydrique observé. En effet, des taches d'hydromorphie apparaissent dès 25 cm et, en profondeur, les horizons intermédiaires présentent de nombreuses traînées décolorées, alors qu'en saison des pluies aucun engorgement n'a été observé.

Pourtant les horizons gravillonnaires, qui atteignent la profondeur de 1,5 mètre, permettent une circulation rapide de l'eau. La porosité est en effet constituée, pour une grande part, par l'assemblage des éléments grossiers, ce qui confère au matériau une macroporosité importante (fig. 7).

Par ailleurs, le test de perméabilité (PIOGER modifié) fournit des valeurs de 100 cm/h dès le niveau supérieur, et 200 cm/h, voire 300 cm/h à la base. En fin d'infiltration, l'eau pénètre parfois avec turbulence dans les gros pores et son transfert en profondeur s'accompagne d'un bruit d'écoulement très perceptible. Cette circulation rapide permet un entraînement des particules en suspension, qui se déposent en partie plus bas, les revêtements pouvant alors atteindre 3 cm d'épaisseur. Ces migrations en profondeur se traduisent également par l'apparition des langues où ne se maintiennent que les éléments grossiers en contact les uns avec les autres et les sables grossiers (cf. 3.2.1.).

Dans les horizons intermédiaires (alté-rétichrons), par contre, la macro-porosité est moins développée,

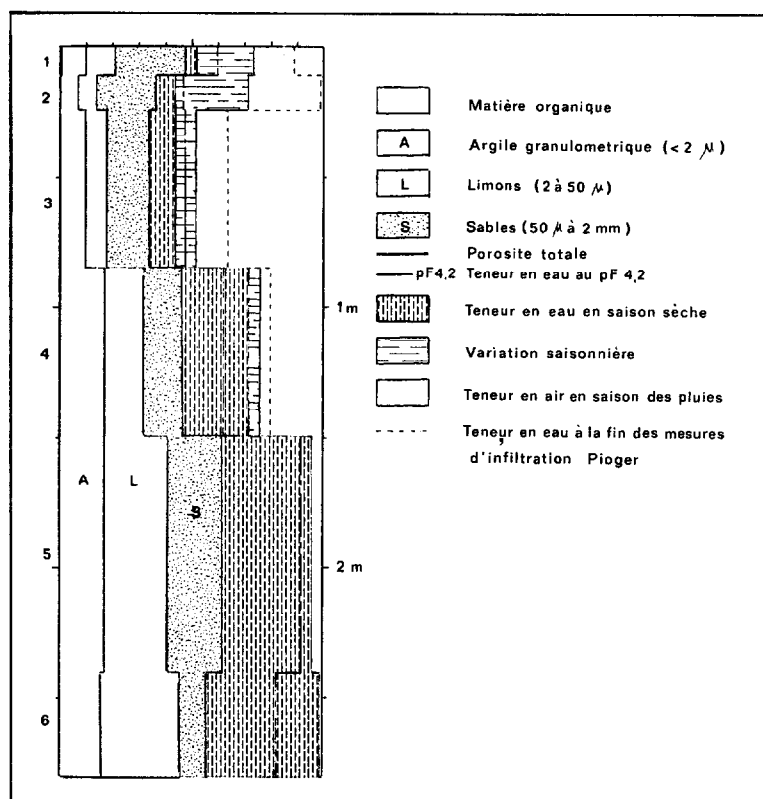


Fig. 7. — Composition volumique de la terre fine en bas de versant (profil III)

mais suffisante cependant pour permettre la circulation de l'eau (fig. 7). Il est néanmoins impossible de procéder à des mesures de perméabilité sous lame d'eau du fait de l'instabilité structurale du matériau ($I_s = 6,0$). L'altérite, dont les caractères morphologiques sont très proches de ceux des sols du haut de versant, ne permet le passage que d'un flux atténué, et peut donc bloquer à la base tout apport important.

L'appauvrissement des horizons gravillonnaires et les caractères hydromorphes du sol ne peuvent donc s'expliquer que par l'action d'une nappe transformante située au sommet de l'altérite, mais il n'est pas possible, à partir des observations réalisées au cours d'une seule saison des pluies (pendant laquelle son existence n'a pu être mise en évidence), de conclure sur le caractère actuel d'un tel mécanisme.

Actuellement, la circulation de l'eau est donc essentiellement verticale, avec apparition hypothétique d'une nappe pendant les périodes particulièrement pluvieuses.

3.5. Le régime hydrique du sol de bas-fond

En début de saison des pluies, l'eau s'infiltré rapidement dans le sol par l'intermédiaire d'un réseau

de fissures qui se prolongent jusqu'à 40 cm de profondeur. Ces fentes expliquent la dispersion des résultats de perméabilité sous lame d'eau (fig. 5).

Le profil se sature ensuite, d'autant plus rapidement que la base est quasi-imperméable, puis le sol est submergé pendant plusieurs semaines ce dont témoignent les taches d'hydromorphie jusqu'en surface.

La fermeture des fissures s'accompagne d'une perte de structure très nette en saison des pluies, qui peut expliquer la compaction du matériau (30 % de porosité totale en profondeur, fig. 6).

4. LE STOCKAGE DE L'EAU DANS LES SOLS

4.1. La méthodologie

Le stockage de l'eau dans les sols conditionne la croissance des végétaux par le biais de deux facteurs différents :

- par la quantité d'eau accessible aux racines ;
- par la fraction de porosité vide d'eau, qui détermine l'aération du sol et la respiration des racines.

TABLEAU 9

Importance de la porosité interne des éléments grossiers dans la porosité des horizons

Site	Référence de l'horizon	Porosité des e.g.* (en % v.+)	Proportions des e.g.		Porosité de l'horizon (en % v.)	
			%m°	%v.	dans les e.g.	hors des e.g.
I	2	18	42	27	5	34
	3	18	57	45	8	23
	4	21	40	30	6	34
II	2	19	59	44	9	27
	3	18	60	45	8	27
III	2	20	75	53	11	30
	3	26	79	59	15	26
	4	30	42	31	9	37

* : éléments grossiers
+ : volume
° : masse

Il s'agit donc de préciser le stock d'eau disponible et la durée des engorgements éventuels. Les variations du stock d'eau ont été étudiées par comparaison des extrêmes saisonniers, l'humidité en saison des pluies étant la moyenne de plusieurs mesures réalisées sur le sol ressuyé. Nous avons pris comme humidité de saison sèche celle de la fin du mois de janvier. Cette date ne correspond pas au dessèchement le plus poussé, la saison des pluies ne débutant que deux mois plus tard. Mais la période d'évapotranspiration maximale est passée (l'harmattan, vent très sec soufflant du Nord Est a cessé) et, de plus, dès le mois de février les premiers orages éclatent.

Pour évaluer le stock d'eau disponible pour les plantes, ces humidités ont été comparées à celles obtenues au pF 4,2 (déterminées à la presse à membrane sur des échantillons remaniés).

L'eau contenue dans les éléments grossiers a été comptabilisée à part ; elle représente une partie importante de l'humidité des horizons gravillonnaires (tabl. 9).

Les différentes valeurs d'humidité ont été transformées en données volumiques et reportées sur les figures 6 et 7.

4.2. L'humidité en fin de saison sèche

Sur tout le profil en I et en II, jusqu'à 1,5 mètre en III, et jusqu'à 1,0 mètre en IV, l'humidité est très proche de celle correspondant au pF 4,2 à la fin du mois de janvier, sauf en surface. Le mécanisme de dessèchement du sol en profondeur semble lié principalement à l'action des racines, même si leur

importance quantitative paraît faible par rapport au volume de l'horizon (fig. 7). En effet, d'une part un dessèchement par évaporation à partir de la surface créerait un profil de succion décroissant en profondeur, alors qu'il est constant, et d'autre part le pF 4,2 correspond à la succion maximale atteinte par la majorité des racines.

Le dessèchement de surface n'est pas plus accentué en I qu'en III : la végétation, forêt claire dans un cas, savane faiblement arborée dans l'autre, n'intervient donc que peu. Ce dessèchement abaisse l'humidité volumique à 5 % (soit le quart de l'humidité à pF 4,2), mais il n'affecte que les 15 premiers centimètres. Au cours des deux mois de saison sèche restants, il doit se propager en profondeur, probablement plus en III, soumis à l'insolation directe après les feux de brousse, qu'en I où le couvert végétal limite l'échauffement. En tout état de cause, la dessiccation à une humidité inférieure à celle du pF 4,2 des horizons compris entre 15 et 50 cm ne peut excéder deux mois.

4.3. Les variations annuelles

Sur les trois quarts supérieurs du versant (sites I et II), l'humidité varie annuellement jusqu'au niveau de l'altérite, laquelle reste à une humidité proche de celle du pF 4,2. En bas de versant (site III) les variations d'humidité sont fortes en surface, mais assez faibles en profondeur : dans les horizons gravillonnaires, l'humidité de la terre fine varie considérablement, mais cela ne représente qu'une part très limitée du volume total de l'horizon (l'humidité

TABLEAU 10
Variations annuelles du stock d'eau (en mm d'épaisseur de la lame équivalente)

	Site I		Site II		Site III		Site IV
	dans la terre fine	eau stockable par les EG *	dans la terre fine	eau stockable par les EG	dans la terre fine	eau stockable par les EG	
Sur 50 cm	64	20	87	30	50	53	142
Sur 75 cm	80	43	104	50	57	91	182
Sur 100 cm	108	47	122	50	63	120	222
Sur 150 cm	173	47	153	50	75	165	?
Sur 200 cm	227	47	176	50	75	165	?

* : éléments grossiers.

des éléments grossiers n'est pas prise en compte ici) et en profondeur (réti-altérite et altérite) l'humidité reste élevée toute l'année.

L'étude des variations du stock d'eau au cours de l'année (tabl. 10) est imprécise car nous ne connaissons pas la dynamique de l'eau contenue dans les éléments grossiers. Il semble toutefois, mais cela reste à confirmer, que la porosité des éléments grossiers soit très fine, et que l'eau qu'elle contient ne soit libérée que pour des pF supérieurs à 4,2. Les éléments grossiers ne semblent donc pas participer à l'alimentation hydrique des végétaux.

L'humidité restant pratiquement constante au delà de deux mètres, la variation annuelle du stock d'eau des sols peut être évaluée à 227 mm en I, 176 mm en II, 75 mm en III et 222 mm en IV.

Ces chiffres soulignent la faible variation de stock sur le site III et précisent la quantité d'eau qui peut être stockée dans les « horizons tampons » qui surmontent l'altérite en sommet de versant. Pour les sites I, II, IV ce stock représente environ un mois d'ETP contre moins de quinze jours pour le site III, ce qui entraîne des risques élevés de sécheresse, préjudiciables au développement des cultures, pour les sols de bas de versant.

4.4. Conclusions

Les sols I et II ne diffèrent donc ni par leur organisation, ni par leur régime hydrique de profondeur mais uniquement par les propriétés de l'horizon superficiel, et ceci malgré de fortes différences dans le couvert végétal (forêt claire en I, savane arborée en II). Une étude antérieure (AVENARD, 1971), menée dans une région comparable par son climat, montrait que les sols sous forêt restent humides au moins 10 mois sur 12 alors que les sols sous savane se dessèchent sur la totalité de leur profil. Si l'on se

réfère à nos résultats, cette différence est imputable non pas directement à la nature du couvert, mais plutôt au comportement des horizons superficiels. La variation très rapide du couvert végétal entre les deux premiers sites ne peut pas être attribuée à une influence de la nature des horizons profonds et de leur régime hydrique. Elle est probablement liée à l'action humaine, le passage annuel des feux de brousse (auxquels s'ajoute peut-être l'effet d'anciens défrichements) ayant repoussé la forêt vers le haut du versant. A 60 kilomètres plus au sud, la mise en défens par le CTFT (1) de parcelles de savane a d'ailleurs permis la reconstitution spontanée de la forêt. Sa disparition sur le site II aurait entraîné une modification des caractères de la surface du sol et des propriétés de l'horizon superficiel.

Sur le site III, par contre, les faibles réserves hydriques (75 mm sur une profondeur de deux mètres) constituent un caractère naturel défavorable à un couvert forestier dans les conditions actuelles de climat.

D'après les données obtenues sur le pédo-climat, la forêt devrait donc s'étendre davantage sur le versant, sans toutefois parvenir jusqu'en bas de pente. Dans cette zone climatique, s'il semble bien que la végétation soit liée au régime hydrique des sols, la limite entre la forêt et la savane peut ne pas toujours correspondre sur les versants à des différences édaphiques. Il faut y voir alors la conséquence de l'action humaine.

5. CONSÉQUENCES POUR LA MISE EN VALEUR

5.1. Existence d'un gradient latéral de contraintes

L'analyse des paramètres physiques chimiques et biologiques fait apparaître l'existence, à l'état natu-

(1) CTFT = Centre Technique Forestier Tropical.

TABLEAU 11

Variation toposéquentielle des principaux caractères intervenant sur la mise en valeur

Principaux caractères		Site I	Site II	Site III
Pente %		moins de 3 %	3,5 à 6 %	4,0 à 6,5 %
Profondeur utilisable par les racines (cm)		190	105	85
Enracinement (profondeur en cm où la densité racinaire est supérieure à 1 g de matière sèche/ litre de sol)		45	40	15
Taux volumique maximal d'éléments grossiers (%)		45	45	59
Hydromorphie		-	-	taches à partir de 25 cm
Réserve en eau (mm)		227	176	75
Intensité limite de ruissellement (mm/h, parcelle labourée)		20,3	11,1	6,1
Nombre de lombrics au mètre carré		101	54	50
Taux de mat. org. (%)	hor. supérieurs	4,6	3,3	2,3
	hor. gravillon.	1,1	0,9	0,8
Somme des bases (meq/100 g de sol)	hor. supérieurs	11,0	5,4	5,0
	hor. gravillon.	4,6	1,1	2,0
Azote total (‰)	hor. supérieurs	1,8	1,4	1,0
	hor. gravillon.	0,8	0,7	0,3
Phosphore total (‰)	hor. supérieurs	1,0	0,6	0,4
	hor. gravillon.	0,6	0,4	0,3

rel, d'un *gradient de contraintes* croissant du sommet vers le bas du versant (tabl. 11).

Le sol de bas de pente présente donc un certain nombre de contraintes qui rendent sa mise en valeur plus difficile. C'est pourquoi la partie supérieure du versant et son sommet sont à utiliser en priorité lors de la mise en valeur. D'ailleurs, dans l'ensemble de la région, et ceci quel que soit le paysage morpho-pédologique, les qualités agronomiques décroissent vers l'aval des versants. Les périmètres cotonniers sont effectivement installés en priorité sur les sommets des versants afin de profiter simultanément de la bonne qualité agrologique des terres et des pentes faibles.

5.2. La mise en valeur des sols

Si l'on se réfère aux résultats de cette étude, il apparaît clairement que c'est le site I qui devrait prioritairement être choisi dans le cas d'une mise en valeur. C'est en effet lui qui présente les contraintes physiques les moins fortes et la fertilité chimique la plus intéressante (fig. 8).

Il serait toutefois hasardeux d'utiliser les données acquises sous milieu naturel pour prévoir le comportement des sols après défrichement. Les mesures d'infiltrabilité ont montré en effet (tabl. 3) que la

suppression du couvert végétal et le travail du sol avaient pour effet d'estomper les différences enregistrées en conditions naturelles. En outre, il est fréquent que le travail du sol provoque la formation dans le profil d'une discontinuité structurale (semelle de labour) qui bloque la pénétration racinaire à la base des horizons labourés (de BLIC, 1976). Ainsi, les organisations et le fonctionnement des horizons profonds auraient peu d'influence sur les plantes cultivées. Seules des enquêtes, ou des expérimentations appropriées peuvent permettre la prévision du comportement des sols lors de leur mise en valeur.

5.3. Le classement des terres

Les modifications structurales et chimiques des sols induites par la mise en valeur étant mal connues, il est nécessaire de fonder le classement des terres sur des caractères invariants. C'est pourquoi nous préconisons, pour le centre et le nord de la Côte d'Ivoire, de ne prendre en compte que les caractères physiques des sols (profondeur accessible aux racines, texture, taux et profondeur d'apparition des éléments grossiers et hydromorphie), comme ce fut le cas pour la synthèse régionale établie pour les cultures pluviales (POSS et SABATHE, 1983). Le classement obtenu est identique sur la toposéquence étudiée et pour

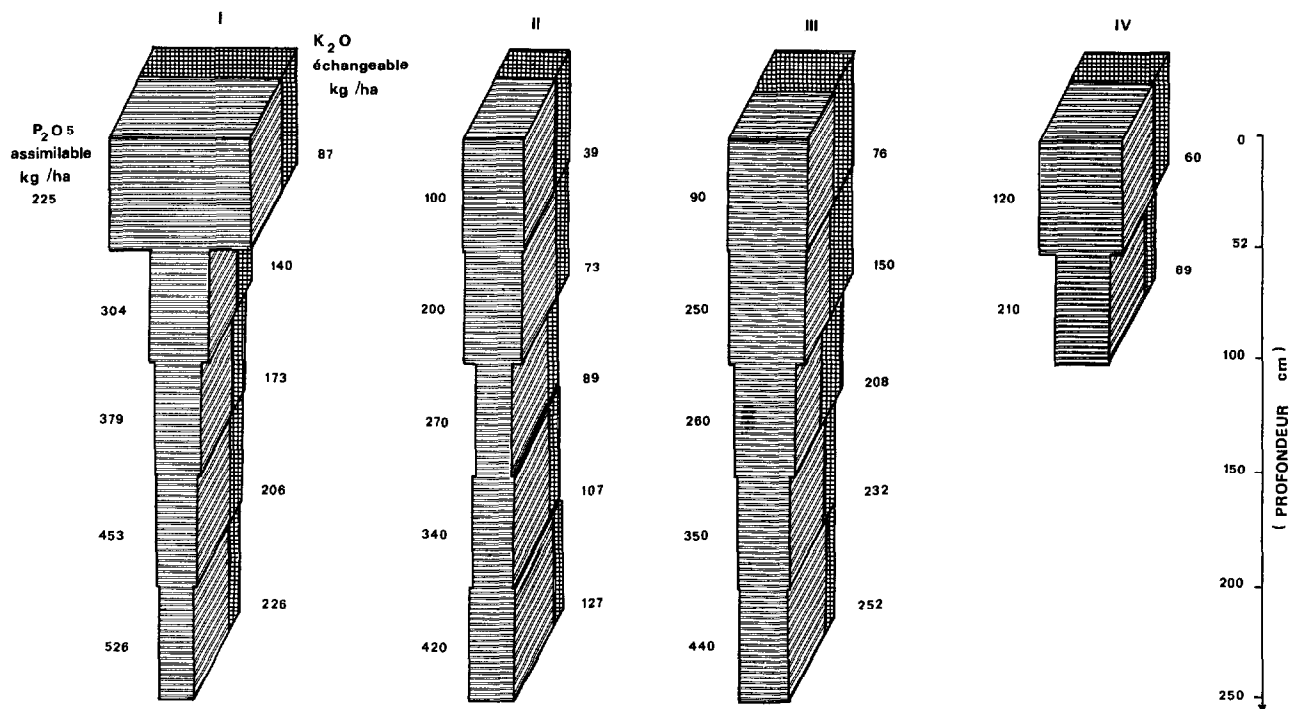
Fig. 8. — Quantités par hectare cumulées pour différentes profondeurs de P_2O_5 assimilable et de K_2O échangeable

TABLEAU 12

Classement agrologique des sols de la toposéquence (6 classes numérotées de 1 à 6, de qualité agrologique décroissante)

Sites	CLASSEMENT PAR TYPE DE CONTRAINTE				CLASSEMENT FINAL	
	Profondeur Roche R Cuirasse Cu Altérite Al	Texture t	Éléments grossiers g	Hydromorphie h	du sol	des sols de l'unité cartographique correspondante
I	1	1	3	1	3 g	30 % en 2 g 40 % en 3 g 30 % en 4 g
II	1	1	3	1	3 g	
III	1	1	4	4	4 gh	5 % en 2 g 50 % en 3 t (CuAlgh) 40 % en 4 CuAlgh 5 % en CugAl
IV	1	1	1	6	6 h	5 ou 6 h

l'ensemble du paysage (tabl. 12), ce qui confirme *a posteriori* sa représentativité.

Il correspond au gradient de contraintes mis en évidence par l'étude détaillée des sols ; en particulier les deux premiers sites appartiennent à la même classe agrologique conformément aux conclusions

précédentes (cf. 4.4.). Que les critères de classement fassent appel à des caractères physiques généraux ou aux résultats de cette étude, le classement est donc comparable. Il faut y voir le résultat de l'interrelation entre certains caractères du sol. C'est le cas de la texture dans ce milieu où la minéralogie des

argiles varie peu, qui conditionne largement autant la chimie des sols que la capacité de rétention en eau. C'est pourquoi, à l'échelle régionale, le classement des terres varie peu quels que soient les critères de classement retenus.

CONCLUSION

Conformément à l'objectif fixé, cette étude a permis d'obtenir des données quantifiées relatives à l'organisation et au fonctionnement des sols du paysage le plus représenté dans la région de Katiola. Ils font apparaître une étroite concordance entre les différents gradients de contraintes observés le long d'un versant : le drainage est libre et vertical toute l'année en sommet de forme, sous forêt, là précisément où les structures et les porosités sont le plus favorables à la circulation des flux d'air et d'eau, où la fertilité chimique est la plus marquée, où l'infiltrabilité est la plus élevée, où les matériaux superficiels sont les plus résistants à la détachabilité, et où finalement, l'activité biologique est la mieux exprimée. A l'inverse, en bas de versant, les organisations sont liées à un drainage ralenti, voire à l'apparition d'une nappe temporaire, les contraintes physiques et chimiques sont plus manifestes tandis que l'activité biologique est plus limitée.

Ces résultats apportent également un éclairage sur l'histoire récente de ces sols : c'est l'intervention de l'homme sous la forme des feux de brousse et du défrichement qui permet d'interpréter le décalage entre les réserves hydriques des sols et leur couvert végétal actuel.

Il convient toutefois de souligner les limites de ce travail afin d'orienter les travaux ultérieurs : si les renseignements apportés sont déjà précieux, ils le seraient davantage encore si avaient été mieux prises en compte les deux autres dimensions de la couverture pédologique : variations latérales, et dans le temps. Ainsi l'étude toposéquentielle devrait être remplacée par l'étude d'une unité morphostructurale (un petit bassin versant, par exemple). L'accent devrait également être mis sur les évolutions à la fois structurales et fonctionnelles induites d'une part par les variations climatiques saisonnières, d'autre part par la mise en valeur des sols.

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude envers MM. CHATELIN et HUMBEL, pédologues à l'Orstom, pour leurs conseils et encouragements.

*Manuscrit reçu au Service des Éditions de l'O.R.S.T.O.M.
le 17 mai 1984*

BIBLIOGRAPHIE

- ASSELIN (J.), VALENTIN (C.), 1978. — Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Hydrol.*, vol. XV, n° 4 : 321-349.
- AVENARD (J. M.), 1971. — La répartition des formations végétales en relation avec l'eau du sol dans la région de Man-Touba. *Trav. Doc.* n° 12, O.R.S.T.O.M. (Paris), 159 p.
- BLIC (Ph. de), 1976. — Le comportement de sols ferrallitiques de Côte d'Ivoire après défrichement et mise en culture mécanisée : rôle des traits hérités du milieu naturel. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, XIV (2) : 113-130.
- BLIC (Ph. de), 1979. — Micromorphologie de la partie supérieure des sols en zone de culture semi-mécanisée dans le Centre ivoirien. *Inst. Sci. de la terre* (Dijon), 58 p., *multigr.*
- BOULET (R.), BRUGIÈRE (J. M.) et HUMBEL (F. X.), 1979. — Relations entre caractères hydrodynamiques et organisation des systèmes de sols en Guyane française septentrionale. Rôle de la tectonique dans l'évolution de la couverture pédologique. Conséquences agronomiques. *Sc. du Sol*, n° 1 : 3-18.
- BRUNET-MORET (Y.), 1967. — Étude générale des averses exceptionnelles en Afrique occidentale. République de Côte d'Ivoire. *Rapp. O.R.S.T.O.M./C.I.E.H.*, 20 p., *multigr.*
- CAMUS (H.), CHAPERON (P.), GIRARD (G.) et MOLINIER (M.), 1976. — Analyse et modélisation de l'écoulement superficiel d'un bassin tropical. Influence de la mise en culture. Côte d'Ivoire, Korhogo. *Trav. Doc.*, n° 52, O.R.S.T.O.M. (Paris), 81 p.
- CHATELIN (Y.) et MARTIN (D.), 1972. — Recherche d'une terminologie typologique applicable aux sols ferrallitiques. *Cah. O.R.S.T.O.M. sér. Pédol.*, X (1) : 25-43.
- COLLINET (J.), VALENTIN (C.), 1979. — Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Nouvelles perspectives-Applications agronomiques. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. XVII, n° 4 : 283-328.
- COLLINET (J.), VALENTIN (C.). — Evaluation of water erosion factors in western Africa using rainfall simulation. 16 p., soumis à publication.
- HILLEL (D.), 1974. — L'eau et le sol. Principes et processus physiques. Traduit de l'anglais par BACKER (L. W. de)-Vander édit., Leuven, Paris, Bruxelles, 288 p.
- LAFFORGUE (A.), 1977. — Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. Application à une exploitation méthodique des données obtenues sous pluies simulées. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Hydrol.*, XIV (4) : 299-344.
- LHOMME (J. P.) et MONTENY (B.), 1979. — Étude agroclimatique de la région centre-Bandama de Côte d'Ivoire. *Rapp. O.R.S.T.O.M./A.V.B.* (Adiopodoumé), 43 p., *multigr.*
- PIOGER (R.), 1952. — Mesures d'infiltration sur le terrain. Interprétation des résultats. E.N.A., Grignon, 27 p., *multigr.*
- POSS (R.), 1982. — Étude morpho-pédologique de Katiola (Côte d'Ivoire). *Not. expl.*, n° 94, O.R.S.T.O.M. (Paris), 142 p., 2 cartes h.-t.
- POSS (R.), SABATHE (R.), 1983. — Étude des aptitudes culturales de la région de Katiola pour les cultures pluviales annuelles, mécanisées, en assolement intensif. 30 p., O.R.S.T.O.M. (Paris), doc. additif à not. expl., n° 94.
- ROOSE (E. J.), 1977. — Érosion et ruissellement en Afrique de l'ouest. Vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. *Trav. Doc.*, n° 78, O.R.S.T.O.M. (Paris), 108 p.
- RUIZ FIGUEROA (J. F.), 1983. — Les micro-organisations pelliculaires superficielles formées sous pluie simulée sur des sols ferrallitiques de savane (centre nord de la Côte d'Ivoire). Comportement hydrodynamique et mécanique de ces pellicules de battance en relation avec la texture la couverture du sol, et la levée du riz pluvial. Th. de Doc. Ing., Inst. Nation. Agron. Paris-Grignon, 167 p. *multigr.*
- VALENTIN (C.), 1978. — Problèmes méthodologiques de la simulation de pluie. Application à l'étude de l'érodibilité des sols. In : « Actes du colloque : Erosion agricole des sols en milieu tempéré non méditerranéen ». Strasbourg-Colmar. Univ. Strasbourg-I.N.R.A. édit. : 117-122.
- VALENTIN (C.), 1981. — Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région subdésertique (Agadez-Rep. du Niger). Dynamique de formation et conséquences sur l'économie de l'eau. Th. 3^e cycle, Un. Paris VII, 229 p., *multigr.*
- VALENTIN (C.), 1983. — Effects of grazing and trampling around recently drilled water holes on soil deterioration in the Sahelian zone. *Proc. of the Int. Conf. on Soil Erosion and Conservation*, Honolulu, 34 p., 7 fig., 2 tab., 3 ill., 26 ref., to be published.
- WISCHMEIER (W. H.), JOHNSON (C. E. B.) et CROSS (B. V.), 1971. — A soil erodibility nomograph for farm land and construction sites. *J. of Soil and Water Cons.*, 26 (5) : 5-9.